ویژگی‌های لرزه‌خیزی دشت سیلاخور بروجرد بر اساس داده زمین‌لرزه‌های ثبت شده در یک شبکهٔ لرزه‌نگاری موقت

طاهره شهرابی، غلام جوان دولویی: پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

Javandoloei@iiees.ac.ir

تاریخ: **دریافت** ۸۸/۲/۲۷ **پذیرش** ۸۹/۳/۲۹

چکیده

دشت سیلاخور بروجرد بین دو زون زاگرس مرتفع و سنندج-سیرجان است و یکی از مناطق لرزه‌خیز کشور به‌شمار می‌رود. بررسی گسل‌های منطقه و کانون‌های سطحی زمین لرزه‌ها در منطقه نیز نشان دهندهٔ وقوع زمین لرزه‌هایی با تعداد نسبتاً زیاد و بزرگی متوسط تا بزرگ است. بررسی زمین لرزه‌های تاریخی نیز نشان‌دهنده بروز زمین‌لرزه‌های متعددی در گستره بررسی شده درگذشته است و گستره بیشینه تخریب و صفحه گسل در سازوکارهای کانونی تعیین شده از روند شمال غربی–جنوب شرقی آن‌ها تبعیت می‌کنند.

بررسی توزیع مکانی پس لرزه‌های زمین لرزه ۱۳۸۴/۲/۳۱ بروجرد بر روی نقشهٔ توپوگرافی منطقه، نشان می‌دهد که اکثر پس لرزه‌ها در منطقه کانون سطحی زمین لرزه اصلی یعنی در ناحیه گسل قلعه حاتم به وقوع پیوسته‌اند. هم‌چنین با تعیین محل پس لرزه‌های زمین‌لرزه ۱۳۸۵/۱/۱۳ مشخص شد که اکثر پس لرزه‌ها در منطقه کانون سطحی زمین‌لرزه اصلی، یعنی گسل دورود بوقوع پیوسته‌اند. به‌عبارت دیگر، فعال شدن گسل مسبب زمین‌لرزه‌های اصلی ایجاد کننده پس‌لرزه‌ها بوده است. همچنین سازوکارهای محاسبه شده برای زلزله‌ها در این پژوهش، اکثراً امتدادلغز راست‌گرد را در کنار سازوکارهای فشارشی و

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.4.7]

کششی نشان می‌دهند. وجود این سازوکارهای متفاوت در کنار هم‌دیگر نشان دهندهٔ وقوع پدیده افراز در این ناحیه از زاگرس است.

واژه‌های کلیدی: لرزه خیزی ، دشت سیلاخور، گسله فعال

مقدمه

دشت بزرگ سیلاخور در استان لرستان درطول ۴۹-۴۸/۳ درجهٔ شرقی و ۳۴-۳۳/۳ درجهٔ عرض شمالی ما بین زون دگرگونه در امتداد زون سنندج- سیرجان در شمال و زاگرس خرده شده در جنوب واقع شده است. این دشت از اشترینان (شمال غرب بروجرد) تا دورود گسترش دارد و شهرهای اشترینان، بروجرد و دورود به ترتیب از شمال غرب به جنوب شرق در طول آن قرار دارند. دشت سیلاخور عمدتاً از رسوبات آبرفتی شامل پادگانه‌های بلند و قدیمی پادگانه‌های کوتاه و جوان و رسوبات رودخانه‌ای تشکیل شده که می توان رسوبات آنرا به صورت کفهٔ مسطح رس در نظر گرفت. آب‌های سطحی موجود در این دشت شامل رودخانه‌های بزازنا و چالانچولان می باشد.

در روزهای ۱۱، ۱۲ و ۱۳ اردیبهشت ۱۳۸۴، هشت زمین‌لرزه حوالی شهرستان بروجرد به وقوع پیوست که بزرگ‌ترین آن‌ها در ساعت ۵۱: ۱۱ ظهر روز سه شنبه ۸۴/۲/۱۳ با بزرگی محلی ML=4.9 در مقیاس ریشتر رخ داد. در این راستا پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله با طراحی و نصب یک شبکه موقت لرزه‌نگاری به ترتیب در شهرهای بروجرد، نهاوند، دورود، چغلوندی، الشتر و ناحیه توره اقدام به ثبت رویدادهای لرزه‌ای ناحیه دشت سیلاخور بروجرد نمود. هدف این مقاله بررسی ویژگی‌های لرزه‌خیزی دشت سیلاخور بروجرد براساس رویدادهای لرزه‌ای ثبت شده در شبکهٔ لرزه‌نگاری موقت فوق الذکر است. علاوه بر آن خصوصیات پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه۶/۱ ریشتری یازدهم فروردین ماه ۱۳۸۵ که در منطقه دشت سیلاخور به وقوع پیوست مورد بررسی قرار گرفته است (شکل۱).

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.4.7]

گسل‌های بنیادی، جنبا و کواترنر منطقه

از مهم‌ترین گسل‌های بنیادی، جنبا و کواترنر منطقه می‌توان به گسل معکوس اصلی زاگرس و گسل عهدحاضر اشاره نمود (آقانباتی. ۱۳۸۳).

گسل معکوس اصلی زاگرس (MZRF): این گسل جدا کننده زون دگرگونه سنندج-سیرجان از زون زاگرس است. این گسل در ناحیهٔ دشت سیلاخور به صورت تراستی دارای شیب با میل به‌طرف شمال شرق پنهان می‌شود.

گسل اخیر (عهد حاضر) زاگرس (MRF): گسل اصلی جوان یک گسل منفرد نبوده، بلکه از تعدادی بخش‌های گسلی مجزا که اغلب به‌گونهٔ یک الگوی نردبانی راست‌گرد شکل گرفته‌اند تشکیل شده است. از جنوب شرق به شمال غرب قطعات گسل اصلی عبارتند از: گسل دورود، گسل نهاوند، گسل صحنه، گسل دینور، گسل سرتخت، گسل مروارید و گسل پیرانشهر. شرح مختصر قطعه گسلی دورود و قطعه گسلی نهاوند با توجه به این‌که دشت سیلاخور را در برمی‌گیرند ، ضروری به نظر می‌رسد.

قطعه گسلی و لرزه‌زای دورود: دارای سازوکار راستالغز راست‌گرد همراه با یک مؤلفه قائم کوچک است به‌طوری که بخش جنوب غربی آن (واقع در محدودهٔ شمال غرب شهر دورود و مرز جنوبی دشت سیلاخور) نسبت به بخش شمال شرقی به سمت بالا حرکت کرده است. دشت سیلاخور در شمال غرب به‌وسیله گسل نرمال قلعه حاتم (با راستای تقریبی شمال-جنوب) احاطه شده است. به‌عبارت دیگر گسل عادی قلعه حاتم قطعه گسلی دورود را از قطعه گسلی نهاوند جدا می‌کند.

قطعه گسلی کواترنری نهاوند : نیز بخش فعال دیگری از گسل اصلی جوان زاگرس است که با راستای شمال غربی-جنوب شرقی از غرب بروجرد آغاز و از ۲/۵ کیلومتری جنوب غربی شهر نهاوند می‌گذرد و با راستای ۱۴۰ درجه در شمال غرب این شهر ختم می‌شود. این گسل با درازای حدود ۵۵ کیلومتر، دارای سازوکار راستالغز راست‌گرد با شیب زیاد به سمت جنوب غربی است(شکل۲).

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.4.7]

پیشینه لرزه‌خیزی دشت سیلاخور

دشت سیلاخور در طول تاریخ شاهد وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ بوده است که در این قسمت شرح مختصری از آن‌ها ارائه می‌شود (بربریان، ۱۹۹۴).

۱. زمین‌لرزه‌های تاریخی و سده بیستم

- **زمین‌لغزه کهن سیمره (۱۱۰۰۰ سال پیش)**: زمین‌لغزه سیمره در زاگرس با حجمی وسیع از واریزه‌ها احتمالاً یکی از بزرگ‌ترین زمین لغزه‌های گزارش شده در نیم‌کره شرقی کره زمین است که احتمالاً در اثر فعالیت گسل جنبای کبیرکوه با ساز و کار معکوس همراه با وقوع زمین‌لرزه‌ای مخرب شکل گرفته است.
- **زمین‌لرزه ۲ تیر ۲۵۱ ه‍-ش، سیمره**: (۸۷۲/۶/۲۲ م) در این زمین‌لرزه که با وقوع چندین پیش‌لرزه بزرگ همراه بوده است ، منطقهٔ سیمره ویران شد و حدود ۲۰۰۰۰ تن جان باختند.
- **زمین‌لغزه کهن اشتران‌کوه**: دریاچه گهر(۲۹ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان دورود) به احتمال زیاد در اثر وقوع یک زمین‌لرزه شدید و سنگ ریزش‌های پی در پی و بسته شدن دره اشتران‌کوه به‌وجود آمده است. دریاچه کوهستانی گهر که بر روی گسل اصلی امروزی زاگرس (بخش دورود) قرار دارد، بر پهنه رو مرکزی زمین‌لرزه فاجعه بار سیلاخور ۱۲۷۸/۱۱/۳ش. با بزرگی M_s = ۷/۴ منطبق است.
- **زمین‌لرزه ۳ بهمن ۱۲۷۸ش. سیلاخور(۱۹۰۹/۱/۲۳م.)**: زمین‌لرزه فاجعه‌باری با بزرگی ۷/۴ = Ms در بامداد ۱۲۷۸/۱۱/۳ش. درهٔ سیلاخور(جنوب شرق شهرستان بروجرد)را در هم کوبید. در اثر این زمین‌لرزه به‌طور کلی ۱۲۸ آبادی آسیب دیده‌اند که از بین آن‌ها ۶۴ آبادی به‌طور کلی ویران شده و شمار کشته شدگان در آن‌ها بین ۶۰۰۰ تا ۸۰۰۰ نفر بر آورد شده است.
- **زمین‌لرزه ۱۹۶۱/۱۰/۲۸م حیدرآباد**: این زمین‌لرزه با بزرگی Ms = ۴/۶ در ناحیه روستای حیدرآباد (واقع در ۳۵ کیلومتری شمال غربی دورود و۲۱ کیلومتری جنوب بروجرد) و امتداد گسل دورود روی داده است.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.4.7]

- **زمین‌لرزه ۱۹۶۳/۶/۳۰ تقی‌آباد:** این زمین‌لرزه با بزرگی mb = ۴/۹ در ناحیه تقی‌آباد (۵ کیلومتری شمال غربی دورود) روی داد و در حدود ده دهکده آسیب دیدند (بربریان، ۱۹۸۱).

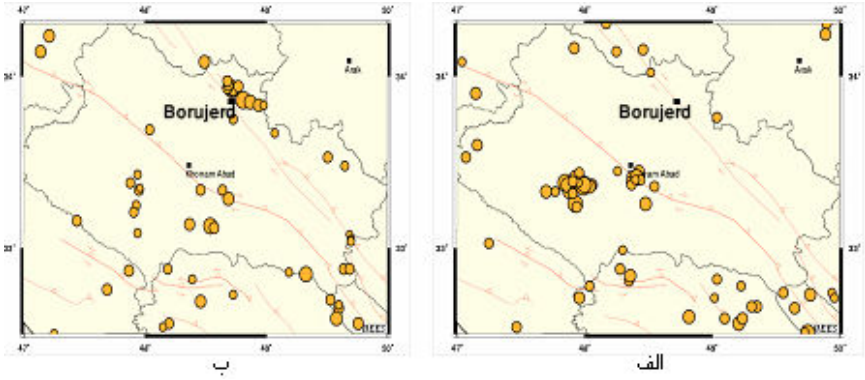
مشاهده فراوانی و بزرگی متوسط به بالا وقوع زمین‌لرزه‌های تاریخی و سده بیستم در ناحیه دشت سیلاخور موئد توان‌مندی و جنبائی گسل‌های منطقه خصوصاً دشت سیلاخور است.

۲. تحلیل زمین‌لرزه‌های سال ۱۳۸۳و سال ۱۳۸۴ استان لرستان

اگرچه آغاز فعالیت‌های لرزه‌ای استان لرستان را از نیمه دوم سال ۱۳۸۱ با وقوع دو زمین‌لرزه ۴/۶ ریشتری جنوب غرب دورود و ۴/۷ ریشتری جنوب شرق نهاوند به‌ترتیب در ۲۵ و ۲۷ اکتبر ۲۰۰۲ باید در نظر گرفت، اما این لرزه‌خیزی بیش‌تر در حاشیه جنوبی استان لرستان و استان‌های همجوار مشهود است. لذا در ادامه لرزه‌خیزی استان لرستان را در سال ۱۳۸۳ مطابق آن‌چه که در شبکهٔ لرزه‌نگاری دائم باند پهن پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله ثبت و پردازش شده است بررسی می‌کنیم. شکل ۲–الف نقشه لرزه‌خیزی استان لرستان را نشان می دهد. بررسی شکل ۱–الف نشان می‌دهد که دو ناحیه پل دختر و جنوب خرم‌آباد در استان لرستان فعالیت بسیار زیادی خصوصاً در نیمه دوم سال ۱۳۸۳ از خود نشان داده‌اند. تعداد رویدادهای این دو خوشه لرزه‌ای (Seismic Cluster) به بیش از ۴۰ رویداد می‌رسد. گویا در سال ۱۳۸۳ سایر نقاط استان لرستان از سکون لرزه‌ای چشم‌گیری برخوردار بوده است.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.4.7]

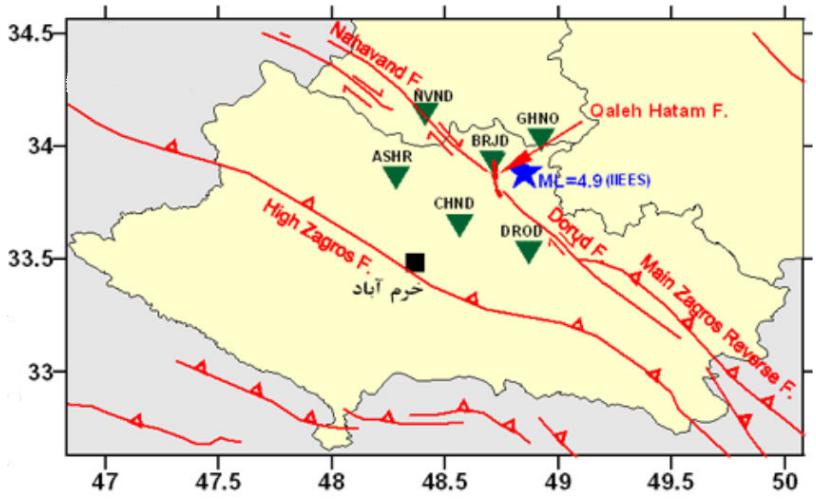


شکل۱. لرزه‌خیزی استان لرستان؛ الف) سال ۱۳۸۳ ،ب) سال ۱۳۸۴

در روزهای ۱۱، ۱۲ و ۱۳ اردیبهشت ۱۳۸۴، هشت زمین‌لرزه متوالی در دشت سیلاخور خصوصا اطراف شهرستان بروجرد به وقوع پیوست که بزرگ‌ترین آن‌ها در ساعت ۵۱: ۱۱ ظهر روز سه‌شنبه ۸۴/۲/۱۳ با بزرگی محلی ML=4.9 در مقیاس ریشتر محاسبه شده است. وقوع رویدادهای پی در پی در منطقه باعث ایجاد خرابی‌های مختصر و هراس مردم شد. در این راستا شبکهٔ لرزه‌نگاری موقت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله با توانمندی شش ایستگاه به ترتیب در شهرهای بروجرد، نهاوند، دورود، چغلوندی، الشتر و ناحیه توره به فاصله کوتاه چندین روز پس از زمین‌لرزه ۱۳۸۴/۲/۱۳ مطابق نقشه شکل۲ نصب و راه‌اندازی شد. نوع تجهیزات لرزه‌نگاری مورد استفاده در شبکه موقت پژوهشگاه CMG-6TD سه مؤلفه‌ای با نمونه‌برداری ۱۰۰ نمونه در ثانیه بوده است و در مدت ۲۵ روز حدود ۸۰ پس‌لرزه و رویداد لرزه‌ای ثبت شده است.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.4.7]

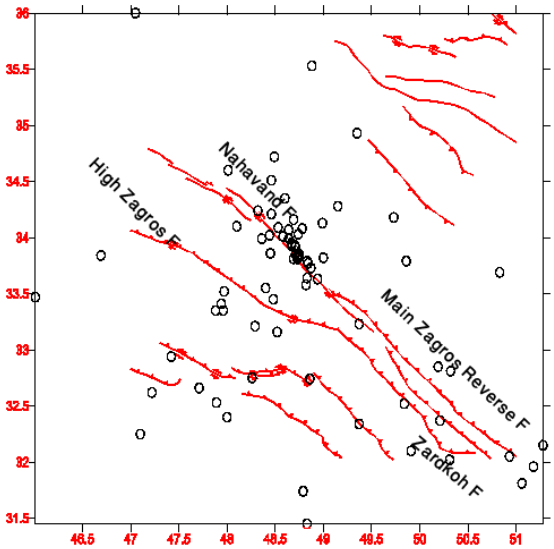


شکل۲. زمین‌لرزه ۱۳۸۴/۲/۱۳ بروجرد و نقشهٔ شبکه لرزه‌نگاری موقت پژوهشگاه (اقتباس ازسایت پژوهشگاه)

تعیین محل رویدادها بر اساس روش چند ایستگاهی صورت گرفته است. با این معیار که هر رویداد حداقل در چهار ایستگاه لرزه‌نگاری ثبت شده باشد و خطای محاسبات rms برای بازماندهای زمانی هر رویداد اگر کم‌تر از ۰/۲۵باشد در پژوهش لحاظ شده است. پردازش اطلاعات لرزه‌ای ثبت شده در شبکه موقت و ترسیم موقعیت مکانی آن‌ها بر روی نقشهٔ گسل‌های منطقه نشان می‌دهد که تعداد زیادی از رویدادهای ثبت شده پس از زمین‌لرزه ۱۳۸۴/۲/۱۳ در امتداد گسل نرمال قلعه حاتم رخ داده‌اند(شکل۳). این نتیجه موید فعال شدن گسل قلعه حاتم در اثر زمین‌لرزه اصلی سیزدهم اردیبهشت۱۳۸۴ علاوه بر قرارگرفتن توزیع مکانی پس‌لرزه‌ها در ناحیه وقوع رویداد اصلی است. علاوه برآن بررسی شکل۱- ب نشان می‌دهد که در سال ۱۳۸۴ فعالیت لرزه‌ای استان لرستان برخلاف سال ۱۳۸۳ از غرب (ناحیه پل دختر) و مرکز استان (جنوب بروجرد) به شرق استان (ناحیه دشت سیلاخور، حدفاصل دورود - بروجرد) منتقل شده است.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.4.7]



شکل۳. توزیع مکانی پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه ۱۳۸۴/۲/۱۳ بروجرد و رویدادهای لرزه‌ای لرستان ثبت شده در شبکه موقت لرزه‌نگاری پژوهشگاه از ۱۳۸۴/۲/۱۵ به مدت یک ماه

به منظور ارزیابی اولیه از عمق کانونی پس‌لرزه‌های ثبت شده در شبکه موقت لرزه‌نگاری ، دو مقطع عمود برهم با راستاهای شرقی- غربی و شمالی- جنوبی انتخاب و بررسی شدند. بر اساس این بررسی مشخص گردید که بیش از ٪۵۰ پس لرزه‌ها دارای عمق کم‌تراز ۱۵کیلومتر بوده‌اند. حدود ٪۲۰ آن‌ها که عمق بیش از ۲۰ کیلومتر را نشان می‌دهند ناشی از خطای محاسباتی برای تعیین محل رویدادهائی است که خارج از محدودهٔ شبکهٔ لرزه‌نگاری رخ داده‌اند. عامل دوم مؤثر بر افزایش خطا در محاسبه عمق فاصله نسبتاً زیاد بین ایستگاه‌ها است. استنتاج اولیه از برآورد عمق تقریبی برای زون لرزه‌زا در این منطقه حدود ۱۴ کیلومتر و حتی کم‌تر از آن است.

تحلیل زمین‌لرزه ۱۱ فروردین ۱۳۸۵ درب آستانه سیلاخور با بزرگی ML=6.1 و پس‌لرزه‌های آن

۱. موقعیت مکانی ، بزرگی و سازوکارکانونی زمین‌لرزه ۱۱ فروردین ۱۳۸۵ درب آستانه سیلاخور: وقوع زمین‌لرزه ۴:۴۷ بامداد روز ۸۵/۱/۱۱ در جنوب بروجرد ۶۶ کشته و حدود ۱۲۸۰ نفر مجروح داشت و به سیصد و سی روستا در منطقه دشت سیلاخور (از توابع بروجرد

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-04-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.4.7]

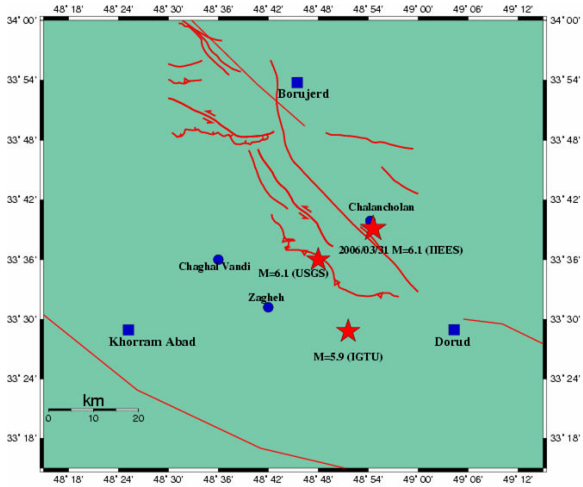
و دورود) آسیب رساند. همه روستاهای دشت سیلاخور حد فاصل دورود و بروجرد محل وقوع این زلزله، بین سی تا صددرصد تخریب شدند. وقوع این زمین‌لرزه در نزدیکی راستای گسل اصلی جوان زاگرس(قطعه گسلی دورود) بیان‌گر فعالیت مجدد این قطعه گسلی است. با توجه به مشاهده بیش‌ترین تلفات انسانی و خرابی‌های بیش از ۸۰٪ در سازه‌های مهندسی در روستای درب آستانه واقع در سه کیلومتری شمال غرب بخش چالان چولان دشت سیلاخور، این زمین‌لرزه به نام همان روستا مشهور شده است. بزرگی زمین‌لرزه یازدهم فروردین ماه ۱۳۸۵ درب آستانه سیلاخور بر اساس لرزه نگاشت‌های ثبت شده در چهارده ایستگاه لرزه‌نگاری باند پهن پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی‌زلزله ML= ۶/۱ در مقیاس محلی ریشتر محاسبه شد. علاوه بر آن موقعیت مکانی آن در ۳۳/۶۵ درجهٔ عرض شمالی و ۴۸/۹۱ درجهٔ طول شرقی و عمق۱۴ کیلومتری تعیین شد. مقایسهٔ گزارش‌های پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی‌زلزله (IIEES)، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (IGTU) و سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) برای تعیین محل زمین‌لرزه و بزرگی آن در شکل۴ نشان داده شده است. با توجه به فاصله کم‌تر از ۲۰۰ کیلومتری سه ایستگاه شبکهٔ ملی لرزه‌نگاری باند پهن پژوهشگاه به موقعیت زمین‌لرزه ، پوشش نسبتاً مناسب با ایستگاه‌ها در اطراف منطقه آسیب دیده و مقایسه میزان آسیب و خسارات ناشی از زمین‌لرزه در حد فاصل بخش چالانچولان و شهر بروجرد، منطقی‌ترین موقعیت اعلان شده، محاسبه براساس لرزه‌نگاشت‌های ثبت شده در ایستگاه‌های شبکه ملی لرزه‌نگاری باند پهن پژوهشگاه است. گزارش سازمان زمین‌شناسی آمریکا و دانشگاه هاروارد نیز با توجه به فاصله بیش از پانصدکیلومتری ایستگاه‌های آن‌ها مستقر در کویت و برخی کشورهای همسایه ایران با خطای چشم‌گیر ۴۰ کیلومتر انحراف به غرب از کانون مه‌لرزه‌ای همراه است.

در این پژوهش سازوکار کانونی بزرگ‌ترین پیش‌لرزه و پس‌لرزه همراه این زمین‌لرزه بر اساس روش قطبش اولین جنبش موج تراکمی(P) لرزه نگاشت‌های ثبت شده در چهارده ایستگا لرزه‌نگاری باند پهن پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی‌زلزله بر اساس

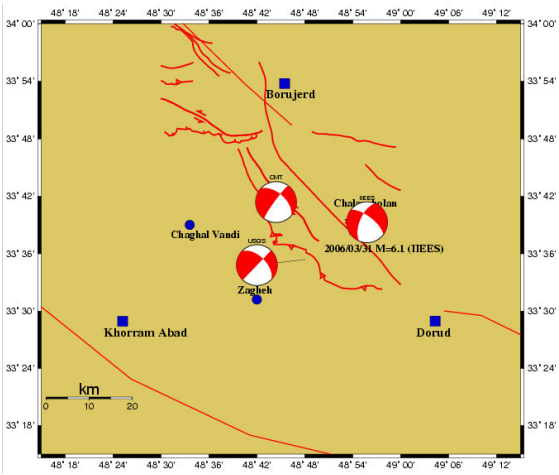
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.4.7]

به‌صورت امتداد لغز راست‌گرد با مؤلفه کوچک فشاری یا کششی با شیب به سوی شمال شرق محاسبه شد که نتایج آن در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل۴. بزرگی و موقعیت مکانی زمین‌لرزه ۱۳۸۵/۱/۱۱ درب آستانهٔ سیلاخور



شکل ۵. سازوکارکانونی بزرگ‌ترین پیش‌لرزه و پس‌لرزه همراه با زمین‌لرزه ۱۳۸۵/۱/۱۱ درب آستانهٔ سیلاخور

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.4.7]

مقادیر محاسبه شده پارامترهای امتداد ، شیب و ریک گسله مسبب پیش‌لرزه، زمین‌لرزه اصلی و پس‌لرزه ارائه شده است. علاوه برآن نتایج با محاسبات سازمان زمین‌شناسی آمریکا و دانشگاه هاروارد (بر اساس روش مدل‌سازی شکل موج دورلرز) مقایسه شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که ساز و کار کانونی محاسبه شده در جدول ۱ با هم تطابق نسبتاً خوبی دارند. با توجه به خطای چشم‌گیر در تعیین مختصات کانونی توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا و دانشگاه هاروارد، تحلیل ساز و کار کانونی و انتساب آن به قطعهٔ گسلی دورود با مشکل جدی همراه است. همان‌طوری‌که در شکل ۵ مشاهده می‌شود موقعیت زمین‌لرزه اصلی در مجاورت گسلهٔ اصلی زاگرس گزارش شده است که فاصله‌ای چشم‌گیر با قطعهٔ گسلی دورود دارد. بنا بر این ساز و کار کانونی امتداد لغز راست‌گرد محاسبه شده برای زمین‌لرزه فوق بر اساس موقعیت مکانی روستای درب آستانهٔ سیلاخور که قطعهٔ گسلی دورود از ضلع شرقی آن می‌گذرد کاملاً توجیه‌پذیر است.

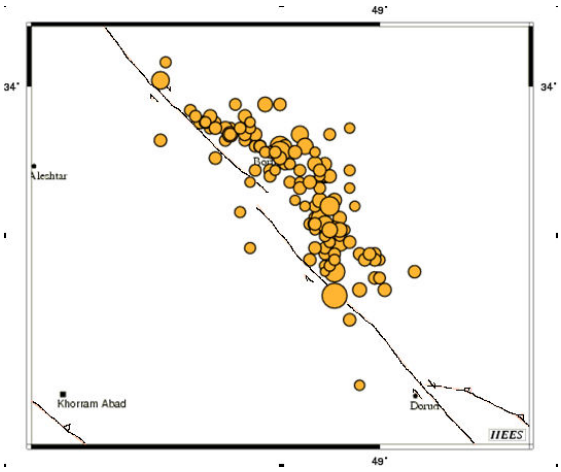
۲. بررسی پس لرزه‌های زمین‌لرزه ۱۱ فروردین ۱۳۸۵ درب آستانهٔ سیلاخور

ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه به گونه‌ای است که پیش از زمین‌لرزهٔ ۱۳۸۵/۰۱/۱۱ درب آستانهٔ سیلاخور، چندین پیش‌لرزه رخ داده است که دو پیش‌لرزه با بزرگای بیش از ۴ (M>4) ثبت شده است. نخستین پس‌لرزه قابل توجه چهارده دقیقه پس از وقوع رویداد اصلی در ساعت ۰۵:۰۱ بامداد روز ۸۵/۱/۱۱ با بزرگی محلی ML=4.9 در مقیاس ریشتر به‌وقوع پیوست. علاوه بر آن بیش از ۴۰۰ پس‌لرزه در شبکه ملی لرزه‌نگاری باند پهن پژوهشگاه ثبت شده است که بزرگ‌ترین آن‌ها با بزرگی ML=5.3 در ساعت ۱۵:۲۶ عصر روز ۱۳۸۵/۱/۱۱ در جنوب شرقی بروجرد رخ داده است. توزیع مکانی ۱۳۰پس‌لرزه که در شعاع ۳۰ کیلومتری شهر بروجرد تعیین محل شده‌اند در شکل۶ نشان داده شده است. این رویدادهای لرزه‌ای به مدت دو ماه(۸۵/۱/۱۱ لغایت ۸۵/۳/۱۱) درگسترهٔ دشت سیلاخور از شمال دورود تا شمال‌غرب بروجرد به‌وقوع پیوسته است. بررسی توزیع مکانی پس‌لرزه‌ها نشان می‌دهد که همه پس‌لرزه‌ها (به استثنا دو مورد) در ناحیه شمال کانون زمین‌لرزه اصلی به وقوع پیوسته‌اند. رویداد پس‌لرزه‌ها بیان‌گر فعال بودن ناحیه بروجرد و جنوب شرق آن است. انحراف مشهود توزیع

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.4.7]

پس‌لرزه‌ها به سوی شرق قطعهٔ گسلی دورود می‌تواند دلیلی بر شیب‌دار بودن صفحهٔ گسل باشد. این نتایج با نوع ساز و کار کانونی محاسبه شده شکل۵ هم‌خوانی دارد. بررسی عمق پس لرزه‌ها نشان می‌دهد که اکثر آن‌ها در عمق۱۴ کیلومتری واقع شده‌اند. بنا بر این با توجه به شیب متوسط ۵۵ درجه (شکل ۵) و عمق متوسط ۱۴ کیلومتر، میزان انحراف پس لرزه‌ها از امتداد قطعه گسلی دورود به سوی شرق تا حدود ۱۰ کیلومتر کاملا توجیه‌پذیر است.



شکل۶. توزیع مکانی پس لرزه‌های دوماهه زمین‌لرزه ۱۳۸۵/۱/۱۱ درب آستانه سیلاخور

تعیین سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های دشت سیلاخور و ناحیه‌های هم‌جوار

در این پژوهش ابتدا سازوکارکانونی زمین‌لرزه‌های ۲۰ سال اخیر (بازه زمانی ۱۹۸۶ تا ۲۰۰۶) از کاتالوگ دانشگاه هاروارد استخراج و در شکل۷ نشان داده شده‌اند. بررسی شکل ۷ نشان می‌دهدکه اکثر ساز و کارهای کانونی محاسبه شده ارتباط نزدیکی با گسل‌های موجود در منطقه دارند و از نوع امتدادلغز راست‌گرد با مؤلفه کوچک فشارشی یا کششی هستند (جدول۲). شماره‌های حاشیه ساز و کارها در شکل۷ مرتبط با آن زمین‌لرزه در جدول ۲ است.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.4.7]

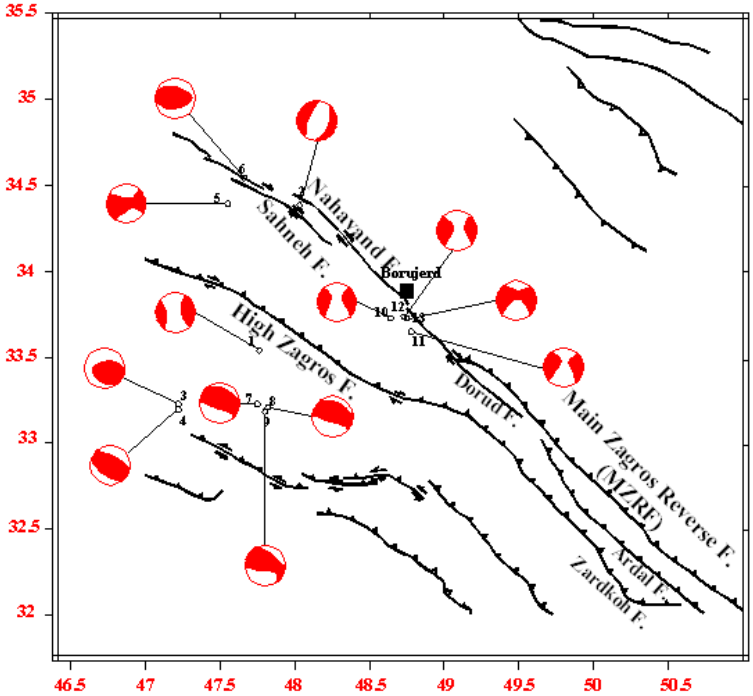
[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.4.7] [Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-04-29]

جدول۱. محاسبه سازوکارهای کانونی محاسبه شده در این پژوهش و مقایسهٔ آن با سایر گزارش‌ها

	Year	Month	Day	Hour	Minute	Second	Error	Latitude	Error	Longitude	Error	Depth	Error	NST	NPH	Gap	Dmin	RMS	ML	Fault Characteristic		
																				STRIK	DIP	RAKE
IIEES	2006	3	30	19	36	18	2.02	33.692	5.7	48.909	6.4	15	10.2	8	10	134	140.1	0.7	5.1	320	60	-140
IIEES	2006	3	31	1	17	2.3	1.71	33.652	9.1	48.912	6.4	14.1	13.3	7	10	210	143	0.5	6	307	67	-148
IIEES	2006	3	31	11	54	2.6	1.4	33.891	5.2	48.795	4.9	17.3	15.8	5	7	136	134.8	0.5	5.2	230	30	-180
CMT	2006	3	31	1	17	10.8		33.69		48.78		12							6.1	311	54	-172
USGC	2006	3	31	1	17	1		33.59	5.4	48.8	5.4	10		95	95	54	365	1	6.1	314	54	180

جدول۲. مشخصات زمین‌لرزه‌های ۲۰ سال اخیر دشت سیلاخور و نواحی اطراف آن

No.	Date	Lat.	Long.	Depth	M_w	Strike1	Dip1	Slip1	Strike2	Dip2	Slip2
1	1987/5/29	33.54	47.76	15	5.3	218	80	2	128	88	170
2	1998/8/21	34.38	48.03	22	4.9	25	39	-84	197	51	-95
3	1998/10/04	33.23	47.22	15	5.3	126	31	121	270	64	73
4	1998/10/05	33.20	47.22	38	5.4	131	41	103	294	50	79
5	2002/04/24	34.39	47.55	33	5.4	36	74	16	302	75	163
6	2002/12/24	34.54	47.66	27	5.2	284	45	105	82	47	75
7	2004/11/21	33.23	47.75	12	5.2	310	26	112	106	66	80
8	2004/11/22	33.21	47.82	12	5.0	308	29	111	105	63	79
9	2004/11/27	33.18	47.80	20	4.9	330	38	145	89	69	57
10	2005/05/03	33.73	48.64	22	4.9	220	71	-17	316	74	-161
11	2006/03/30	33.65	48.78	20	5.1	321	70	-167	226	77	-20
12	2006/03/31	33.74	48.73	17	6.1	313	78	-174	222	84	-12
13	2006/03/31	33.73	48.75	26	5.1	319	67	-168	224	79	-24



شکل۷. سازوکارکانونی زمین‌لرزه‌های مهم دشت سیلاخور و نواحی هم‌جوار بر اساس نتایج دانشگاه هاروارد

بررسی جدول) نشان می‌دهد که زمین‌لرزه ۲۱ اوت ۱۹۹۸ بـا بزرگـی Ms=5 در زون گسـلی نهاوند نشان‌دهنده گسلش نرمال است که در یک زون برشی امتدادلغز راست‌گرد چنین سـاز و کاری توجیه‌پذیر است. زمین‌لرزه ۲۴ آوریـل ۲۰۰۲ بـا بزرگـی Ms=5.2 سـاز و کـار غالـب امتدادلغز راست‌گرد با مؤلفه فشارشی را نشان می‌دهد و زمین‌لرزه۲۴ دسـامبر۲۰۰۲ بـا بزرگـی Ms=4.4 دارای ساز و کار فشارشی است. با توجه به این‌که هر دو زمین‌لـرزه فـوق متـأثر از جنبش گسل صحنه‌اند و از طرفی وجود ساز و کار با مولفهٔ فشارشی در کنـار گسـلش غالـب امتدادلغز را تأیید می‌کنند پدیده افراز در این قسمت مشهود است.

سازوکار زمین‌لرزه سوم مه ۲۰۰۵ (۱۳۸۵/۲/۱۳) از نوع کششی است. بـا توجـه موقعیـت ایـن رویداد در مجاورت گسل نرمال قلعه حاتم، ساختار کششی محاسبه شـده مـورد تأییـد اسـت. زمین‌لرزه‌های۳۰ و ۳۱ مارس ۲۰۰۶، نیز دارای ساز و کار کانونی امتدادلغز راست‌گرد با اندکی

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.4.7]

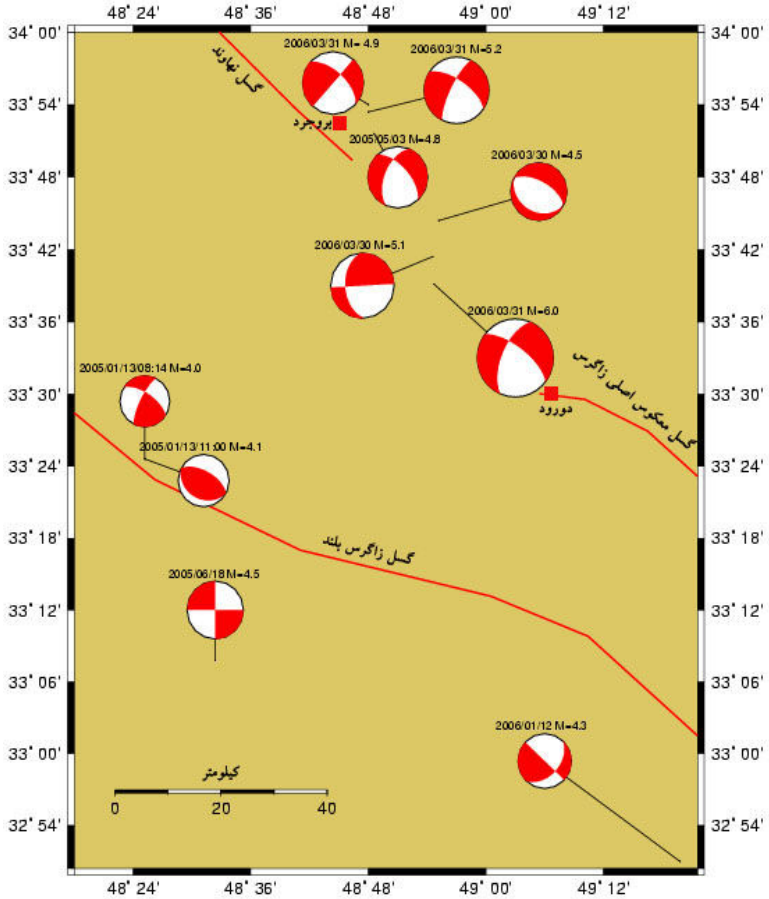
مؤلفه کشش هستند. بنا بر این می‌توان مدعی شد که هر سه رویداد در اثر فعالیت مجدد قطعهٔ گسلی امتدادلغز دورود به وقوع پیوسته‌اند.

در بخش دوم این پژوهش زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۴ منطقه که طی سال‌های ۱۳۸۳ و ۱۳۸۴ در شبکه ملی لرزه‌نگاری باند پهن پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله ثبت شده‌اند، استخراج و بررسی شدند. بر اساس روش قطبش اولین جنبش نیرومند زمین (اسنوکه، ۱۹۹۲) و به کمک نرم‌افزار Focmec پارامترهای ساز و کار کانونی آن‌ها مطابق شکل ۸ به‌دست آمد. علاوه برآن، دو پیش‌لرزه ودو پس‌لرزه زمین‌لرزه ۱۳۸۵/۱/۱۱ نیز تعیین محل شده‌اند.

- با توجه به شکل۸ دو زمین‌لرزه در روز سیزدهم ژانویه ۲۰۰۵ با اختلاف تقریبا سه ساعت و به ترتیب در ساعت۸:۱۴ با بزرگی ۴ و در ساعت ۱۱:۰۰ با بزرگی ۴/۱ در منطقه غرب سیلاخور به وقوع پیوسته است که دارای ساز و کار امتدادلغز با مؤلفهٔ فشارشی و ساز و کار فشارشی خالص هستند. ساز و کار فشارشی آن‌ها با توجه به گسل زاگرس بلند که گسلی معکوس است و مؤلفهٔ امتدادلغز آن با توجه به پدیده افراز توجیه‌پذیر است. شایان ذکر است با توجه به تعداد محدود ایستگاه‌های لرزه‌نگاری موجود در زمان وقوع رویداد و کوچک بودن آن، احتمال بزرگ بودن خطای تعیین محل وجود دارد. بنا بر این نسبت دادن زمین‌لرزه با ساز و کار فشارشی خالص به گسل زاگرس بلند منطقی به نظر نمی‌رسد.
- زمین‌لرزه سوم می ۲۰۰۵(۱۳۸۴/۲/۱۳) نیز که دارای ساز و کار نرمال با مؤلفهٔ امتدادلغز است با ساختار گسل قلعه حاتم که یک گسل نرمال است مطابقت دارد. این ساز و کار با ساز و کار به‌دست آمده از CMT هم‌خوانی می‌کند.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.4.7]



شکل۸. نقشهٔ موقعیت زمین‌لرزه‌های مهم ثبت شده در شبکه ملی لرزه‌نگاری باند پهن پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و ساز و کار کانونی آن‌ها براساس روش قطبش اولین جنبش موج طولی

- مکانیسم زمین‌لرزه۱۲ ژانویه ۲۰۰۶ که امتـدادلغز خـالص اسـت در جهـت امتـداد گسـل زاگرس بلند استو با توجه به این‌که گسل مذکور یک گسل معکوس است مـی‌تـوان وقـوع افراز را دلیلی برای این ساز و کار دانست.
- دو زمین‌لرزه مارس ۲۰۰۶ که با بزرگی ML=4.5 و ML=5.1 اتفاق افتـاده اسـت بـه ترتیب دارای ساز و کار نرمال و ساز و کار امتدادلغز چپ گردند که این موضوع ظاهراً بـا

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.4.7]

تکتونیک منطقه هم‌خوانی ندارند. ولی زمین‌لرزه‌های ۳۱ مارس ۲۰۰۶ دارای ساز و کار امتدادلغز راست‌گرد با مؤلفهٔ کوچک کششی هستند که با ساختار منطقه که دارای ساز و کار امتدادلغز است قابل توجیه است.

بنابراین ساز و کار کانونی امتدادلغز برخی از زمین‌لرزه‌ها نشان می‌دهد که بردار لغزش بر روی گسل‌های امتدادلغز به موازات گسل و امتداد ساختارهای ناحیه‌ای است، و در آن بخش از گسل، گسلش امتدادلغز راست‌گرد رخ می‌دهد. ساز و کار فشارشی برخی از زمین‌لرزه‌ها نشان می‌دهد که بردار لغزش عمود بر روند گسل و ساختارهای منطقه است و با توجه به ساز و کار غالب امتدادلغز که در پژوهش‌های صحرایی و در ساز و کارهای کانونی تعیین شده مشخص است، در این قسمت از گسل کوتاه شدگی و مؤلفه‌های امتدادلغز ناشی از هم‌گرایی مایل از یک‌دیگر افراز شده اند. وجود ساز و کار کششی در برخی مناطق نیز نشان می‌دهد که آن قسمت از گسل با هندسه حوضه‌های کششی در یک زون برشی امتدادلغز راست‌گرد تطابق دارد.

بحث و نتیجه‌گیری

هم‌گرایی مایل دو بلوک باعث ایجاد گسلش معکوس عمود بر روند ساختاری و نیز گسلش امتدادلغز به موازات ساختارهای منطقه می‌شود. در مرزهای هم‌گرای صفحات وقتی سنگ کره اقیانوسی کاملاً در گوشته زمین فرورانده می‌شود، دو قاره با هم برخورد می‌کنند و با برخورد آن‌ها از طریق روراندگی رشته کوه‌هایی به‌وجود می‌آید. (مکنزی و مورگان، ۱۹۶۹). در مراحل تکامل زون‌های برخوردی قاره- قاره علاوه بر دگرشکلی‌هایی نظیر راندگی، کوتاه شدگی به مرحله‌ای از تحول تکتونیکی می‌رسد که فرار جانبی صورت می‌گیرد. به‌عنوان نمونه هنگام هم‌گرایی صفحهٔ عربستان و اوراسیا در محل اتصال گسل‌های شرق و شمال آناتولی در مجاورت مرز ایران و ترکیه برخورد دو قاره یک زوج گسل به طور هم‌زمان ایجاد شده است. در اثر این گسل سرزمین ترکیه به سمت غرب رانده می‌شود و در مقابل در شمال غرب ایران شواهدی مبنی بر رانده شدن این بخش ایران به سمت شرق مشاهده می‌شود.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.4.7]

از طرف دیگر باتوجه به این‌که اگر بلوک‌های دارای مرز گسل در پاسخ بـه نیروهـای ناشـی از جریان‌های پیوسته سیال در گوشته که بر پوسته بالایی اعمال می‌شود حرکت کنند گسـل‌هـایی که به‌صورت مایل در زون تغییر شکل قرار دارند قادر به ایجاد دگرشکلی که در منطقـه اعمـال می‌شود نیستند.(زیرا فرض بر اینست که بلوک‌ها در زمان حرکت حول محور قائم می‌چرخند) در این حالت ساده‌ترین راه برای این که گسل‌ها قادر به ایجاد دگرشکلی در منطقه باشـند ایـن است که حرکت آن‌ها به کوتاه شدگی محض و امتدادلغز محض افراز شود(جکسون و مکنزی، ۱۹۸۳؛ جکسون، ۱۹۹۲؛ پریستلی و همکاران،۱۹۹۴). به‌طور کلی در یک زون گسلی امتـدادلغز که ناهمگنی‌های زمین و خمیدگی‌های سـاختاری چپگـرد[1] و راسـتگرد[2] وجـود داشـته باشـد، ساختارهای دیگری مانند کشش و فشارش نیز به‌صورت فرع بر سـاختار امتـدادلغز مـی‌توانـد ایجاد شود. یعنی مؤلفهٔ غالب امتدادلغز است که کشش یا فشارش هم در آن‌ها ایجاد مـی‌شـود. محیط‌های امتدادلغز کششی که ساختار گل لاله‌ای دارند[3] و محیط‌های امتدادلغز فشارشـی کـه ساختار نخلی[4] شکل دارند (دیویس و رینولدز، ۱۹۹۶) نمونـه‌هـایی از ایـن سـاختارها اسـت. ساختارهای نخلی شکل را در گسل صحنه که یکی از قطعات گسل اصلی عهد حاضر زاگرس است می‌توان مشاهده کرد.

به‌طور کلی دشت سیلاخور پهنه‌ای است با پیشینه لرزه‌خیزی فعال و شاهد زمـین لغـزش‌هـای عظیم و زمین‌لرزه‌های تاریخی مخرب که بین دو زون ساختمانی متفاوت الف) زاگرس مرتفع، ب) زون سنندج-سیرجان قرار گرفته است. بنا بـر ایـن ناحیـه مـورد نظـر دارای تـوان بـالای لرزه‌خیزی است.

- با توجه به ضخامت رسوبات کواترنر و دانه‌بندی آن‌هـا، امکـان رویـداد پدیـده روان‌گرایـی وجود خواهد داشت که این امر بر میزان خسارات وارده خواهد افزود.

---

[1] -Left bending
[2] - Right bending
[3] -Tulip structure
[4] -Palm-tree structure

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.4.7]

- در مقایسه با کاتالوگ زلزله‌های ثبت شده در باند پهن پژوهشگاه زلزله‌شناسی، مشخص شد که تعداد زیادی از رویدادهای ثبت شده در شبکه موقت پژوهشکده زلزله‌شناسی پژوهشگاه با بزرگی کم‌تر از ۲/۵ در مدت زمان بررسی شده در کاتالوگ‌های فوق وجود ندارد. این امر نشان می‌دهد که زمین‌لرزه‌های کوچک در شبکهٔ کشوری و جهانی ثبت نشده‌اند. بنا بر این ضرورت نصب شبکه محلی برای ثبت پس‌لرزه‌ها امری اجتناب‌ناپذیر است.
- ساز و کار کانونی امتدادلغز برخی از زمین لرزه‌ها نشان می‌دهد که بردار لغزش بر روی گسل‌های امتدادلغز به موازات گسل و امتداد ساختارهای ناحیه‌ای است، بنا بر این می‌توان گفت در آن قطعه، گسلش امتدادلغز راست‌گرد رخ می‌دهد.
- ساز و کار فشارشی برخی از زمین‌لرزه‌ها نشان می‌دهد که بردار لغزش عمود بر روند گسل و ساختارهای منطقه است. بنا بر این، با توجه به ساز و کار غالب امتدادلغز که در بررسی‌های صحرایی و در ساز و کارهای کانونی تعیین شده مشخص است، می‌توان پیشنهاد کرد که در این قسمت از گسل کوتاه شدگی و مؤلفه‌های امتدادلغز ناشی از هم‌گرایی مایل از یک‌دیگر افراز شده‌اند.
- وجود ساز و کار کششی در برخی مناطق نشان می‌دهد که آن قسمت از گسل با هندسه حوضه‌های کششی در یک زون برشی امتدادلغز راست‌گرد تطابق دارد.

منابع

۱. آقا نباتی، ۱۳۸۳، زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، خرداد(۱۳۸۳).

2. Berberian. M., Active Faulting and Tectonics of Iran. In: Gupta, H. K. and Delany, F. M., (eds.) Zagros-Hindu Kush-Himalaya Geodynamic Evolution. Am. Geophys. Union, and Geol. Soc. Am. Geodynamics Series (1981) 33-69.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.4.7]

3.Berberian M., Natural hazards and the first earthquake catalogue of Iran, V.I: Historical hazards in Iran prior to 1908, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES) (1994) 603.

4.Mckenzie, D. P. and Morgan, J.W. Evolution of Triple Junctions. Nature, 224, (1969) 125-133.

5.Mckenzie, D. P. and Jackson, J. A. The relationship between strain rates, crustal thickening, Paleomagnetism, finite strain and fault movements within a deforming zone, Earth planet. Sei, Lett., 65 (1983) 182-202.

6.Jackson, J. A, Partitioning of strike-slip and convergent motion between Eurasia & Arabia in eastern Turkey & the Caucasus. J. Geophys. Res., 97, (1992) 12471-12479.

7.Priestley, K., Baker, C. and Jackson, J. Implications of earthquake focal mechanism data for the active tectonics of the South Caspian Basin and surrounding regions. Geophysics Journal International 118 (1994) 111-141.

8.Davis, G. H. and Reynolds, S, structural geology of rocks & regions, John Wiley & sons Inc., New York, (1996) 776pp.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.4.7]